温度对黑纹粉蝶越冬蛹滞育后发育的影响

肖海军[1], 张中州[2], 朱杏芬[1], 薛芳森[1,*]
(1. 江西农业大学昆虫研究所, 南昌 330045; 2. 河南漯河农业科学院, 河南漯河 462000)

摘要: 为了探讨温度对黑纹粉蝶 *Pieris melete* 越冬蛹滞育后发育的影响, 系统调查了越冬蛹滞育解除后在不同恒温下的发育历期及其在自然条件下春后的羽化情况。结果表明: 黑纹粉蝶雄虫和雌虫越冬蛹滞育后发育的阈值温度分别为7.1±1.5℃ 和7.4±0.4℃, 滞育后发育的有效积温分别为133.4±3.3 日·度和155.7±5.3 日·度。根据连续7年黑纹粉蝶越冬蛹在田间的羽化情况, 结合当年春季滞育后发育阈值以上的温度, 推算出田间50%个体成虫羽化时雄虫和雌虫获得的有效积温分别为142.2±12.2 日·度和149.2±13.8 日·度, 与滞育后发育的理论有效积温接近。据此, 利用该理论上的发育阈值温度和有效积温, 参照当年2-4 月的气温, 可预测田间越冬蛹50%个体成虫羽化的时间。

关键词: 黑纹粉蝶; 越冬蛹; 滞育后发育; 发育历期; 发育起点温度; 有效积温
中图分类号: Q968.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0454-6296(2009)04-0401-05

Effect of temperature on post-diapause development in hibernating pupae of the cabbage butterfly, *Pieris melete* Ménétriés (Lepidoptera: Pieridae)

XIAO Hai-Jun[1], ZHANG Zhong-Zhou[2], ZHU Xing-Fen[1], XUE Fang-Sen[1,*] (1. Institute of Entomology, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Luohe Academy of Agricultural Sciences, Luohe, Henan 462000, China)

Abstract: To understand the effect of temperature on post-diapause development of hibernating pupae of the cabbage butterfly, *Pieris melete* Ménétriés, the post-diapause development of hibernating pupae at different temperatures and the adult emergence under natural conditions were systematically investigated. The results showed that the threshold temperature and effective accumulated temperature for post-diapause development of over-wintering male and female were 7.1±1.5℃, 133.4±3.3 day-degrees and 7.4±0.4℃, 155.7±5.3 day-degrees, respectively. According to the observations of emergence of adults under natural conditions and the natural temperatures above development threshold for 7 successive years, the effective accumulated temperature for the emergence of 50% individuals was estimated as 142.2±12.2 and 149.2±13.8 day-degrees for the male and female, respectively, which were close to the theoretical value. The adult emergence date for 50% over-wintering individuals can be calculated by using the theoretical effective accumulative temperature according to natural temperatures between February and April based on the above data.

Key word: *Pieris melete*; overwintering pupae; post-diapause development; developmental duration; low threshold temperature; effective accumulated temperature

昆虫滞育的进程通常分为滞育的诱导、维持、解除、滞育后的休眠和滞育后的发育等一系列生理阶段, 每个生理阶段都强烈地受到环境因子(光照或温度等)的影响和调控(Tauber *et al*., 1986)。了解这些生理阶段的发生与环境条件之间的关系, 不仅能促进我们对昆虫蛰伏生理的理解, 也有助于我们准确预测田间害虫的发生期。滞育解除后, 通常是温度直接决定了滞育后完成发育的时间(Tauber *et al*., 1986; Danks, 1987)。滞育后发育的温度需求已在许多昆虫种类中有报道, 其目的是为了预测昆

基金项目: 国家自然科学基金项目(30760034); 江西农业大学博士科研启动基金项目(2678)
作者简介: 肖海军, 男, 1980 年生, 博士, 讲师, 主要从事害虫综合治理与滞育生理生态研究, E-mail: hjxiao@yahoo.com.cn
*通讯作者 Author for correspondence, E-mail: xue_fangsen@hotmail.com
收稿日期 Received: 2008-11-27; 接受日期 Accepted: 2009-01-18

虫越冬后的活动，或者在害虫综合治理中建立相应的预测物候学模型。为了达到精确的发生期预测，前提是必须明确滞育在自然条件下终止的时间及其滞育后发育的发育起点温度和有效积温需求。

黑纹粉蝶 *Pieris melete* Ménétriés 是我国十字花科蔬菜上重要的多化性害虫，田间为害主要出现在春季和秋季，以滞育蛹越夏和越冬（薛芳森等，1996）。黑纹粉蝶越夏蛹与越冬蛹滞育的维持与解除都直接受温度的影响，高温延缓了滞育的发育，而相对低温则加速了滞育的解除（Xue *et al.*，1997）。但是，黑纹粉蝶田间越冬蛹滞育后发育的起点温度和有效积温迄今仍不清楚。探明滞育后发育的起点温度和有效积温，有利于准确预测其第一代发生期和发生高峰，从而确定防治适期。我们对田间黑纹粉蝶越冬滞育蛹的低温处理实验已表明，黑纹粉蝶南昌种群田间滞育个体在5℃低温条件下处理80 d时基本解除滞育，处于滞育后的休眠阶段，如将此阶段的滞育蛹转入高温处理，则能迅速获得羽化的成虫，滞育后发育的历期与非滞育个体接近（肖海军，2008）。这一研究结果为开展黑纹粉蝶田间越冬蛹滞育后发育起点温度和有效积温的研究提供了前提。在此基础上，我们系统研究了黑纹粉蝶越冬蛹滞育后发育和春季成虫羽化的关系，以期为黑纹粉蝶越冬代成虫的预测预报和种群控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

本实验所用虫源采自南昌市郊（28°46′N，115°50′E），海拔100~200 m的梅岭高坊村。在实验站室外网室中自然条件下连续繁殖后所获得的越冬滞育个体。

1.2 滞育后发育的起点温度与有效积温实验

11月上旬从室外网室采集大龄幼虫（注定滞育的个体），于网室内养虫笼（30 cm×25 cm×35 cm）中饲养化蛹。化蛹10 d后，将滞育蛹转入培养皿（直径15 cm，高度1.2 cm）中，于5℃配合全暗（DD）下处理80 d后，再转至圆形养虫盒（直径15 cm，高度8 cm）中于15，18，20，22，25和28℃，配合中性光周期L∶D=12.5∶11.5下观察蛹的发育进度，每处理观察80~90头。成虫开始羽化时，每日记载雄虫和雌虫羽化的数量。根据在不同温度下的发育历期，按有效积温法则中温度和发育速率的回归方程，再利用回归直线法分别计算出黑纹粉蝶雌雄个体滞育后发育的起点温度（C）和有效积温（K）。

1.3 自然条件下越冬世代春季成虫羽化的观察

2001－2007年，每年11月上旬从室外网室采集大龄幼虫（注定滞育的个体），于网室内养虫笼（30 cm×25 cm×35 cm）中饲养化蛹，养虫笼置于网室内自然条件下。成虫开始羽化时，每日记载雄虫和雌虫羽化的数量。

1.4 春季田间成虫的羽化与温度的关系

在计算自然条件下黑纹粉蝶越冬幼虫滞育后发育的有效积温时，每年从2月1日开始统计，因为此前南昌日平均气温基本低于越冬蛹滞育后发育的起点温度。田间历年温度资料由江西农业大学气象站提供。把黑纹粉蝶田间成虫羽化数转换成累积羽化百分率，同时把每日的有效积温依次累加，采用Stata 9.0数据处理软件模拟有效积温（x）与成虫羽化率（y）关系的Logistic模型：$y=100/[1+\exp(b_1-b_2x)]$，其中，y为累积羽化百分率，x为平均化蛹前期有效积温，b_1为群体50%蛹羽化时有效积温的自然对数，b_2为回归曲线倾斜系数，求出50%个体化蛹时对应的x模拟值（即为50%化蛹率对应的累计有效积温）。根据羽化模型求得的50%化蛹率对应的累计有效积温值，得出群体50%成虫羽化的日期。

1.5 实验条件

所有实验在人工气候箱（LRH-250-GⅡ型）或微电脑控温冰箱中进行。人工气候箱中的光照强度为700~1 000 lx，箱内的温度变化为±1℃。暗期处理采用人工方法进行。5℃低温处理在三星微电脑控温冰箱（SAMSUNG BCD-270 FBNW）中进行，冰箱内的温度变化为±1℃。

1.6 数据处理

实验数据均采用Stata9.0数据处理软件进行方差分析或作回归分析，多重比较采用Bonferroni法进行检测。

2 结果

2.1 滞育后发育的起点温度与有效积温

从图1看出，滞育后发育速率显著受到温度的影响，随着温度的升高，发育速率加快，滞育后发育历期显著缩短（雄蛹：$R^2=0.900\ 4$，$P<0.01$；雌蛹：$R^2=0.9220$，$P<0.01$）（图1）。根据不同温度

下滞育后发育的速率进行直线回归，得出回归方程分别为：雄虫，$y = -0.053207 + 0.007515x_1$（$R^2 = 0.9860$）和雌虫，$y = -0.0472099 + 0.0064209x$（$R^2 = 0.9991$）。应用回归直线法计算出雄虫和雌虫滞育后发育的起点温度分别为 7.1 ± 1.5℃ 和 7.4 ± 0.4℃，滞育后发育的有效积温分别为 133.4 ± 3.3 日·度和 155.7 ± 5.3 日·度。

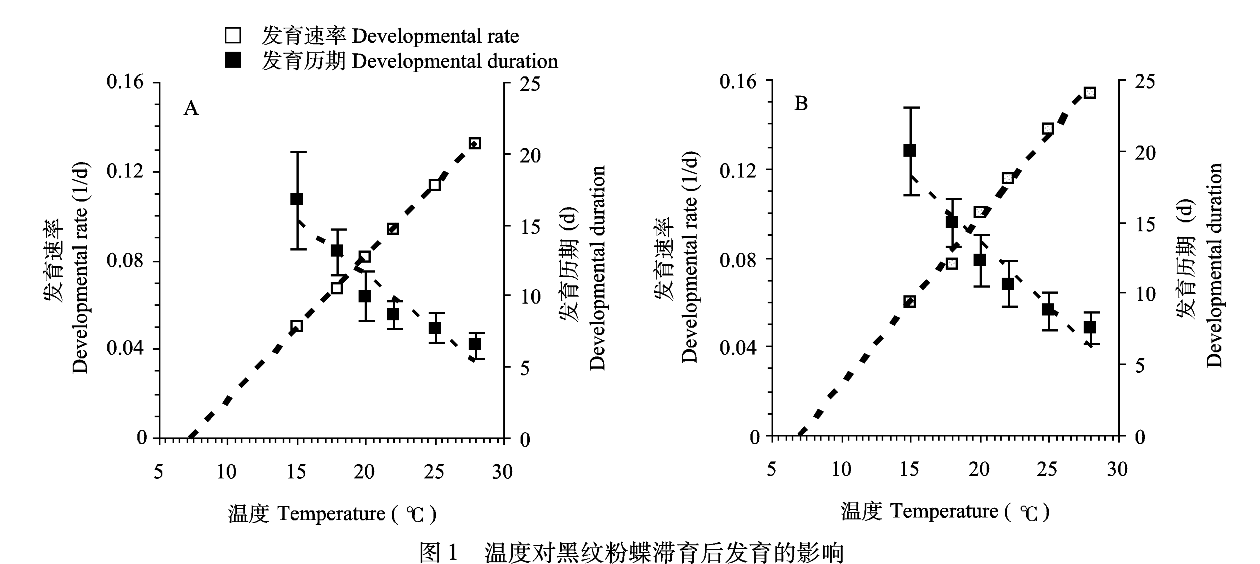


图 1　温度对黑纹粉蝶滞育后发育的影响

Fig. 1　Effect of temperature on post-diapause development of *Pieris melete* hibernating pupae

A：雄虫 Male；B：雌虫 Female.

2.2　春季田间成虫的羽化与温度的关系

连续 7 年自然条件下黑纹粉蝶越冬蛹翌年春季成虫的羽化动态与有效积温的关系见图 2。2002 – 2008 年中，（除极端冬暖的 2007 年外），黑纹粉蝶越冬蛹翌年春季的羽化趋势基本一致，根据这 6 年的温度资料，按滞育后发育起点温度（雄蛹：7.08℃和雌蛹：7.35℃）推算，黑纹粉蝶雄蛹和雌蛹在田间开始羽化时已获得的有效积温约为 52 ~ 110 日·度，羽化高峰约为 120 ~ 150 日·度，羽化盛末期约为 200 ~ 250 日·度（图 2）。根据 7 年田间黑纹粉蝶越冬蛹翌年春季的累积羽化率和对应的有效积温，分别建立黑纹粉蝶越冬蛹已获得的有效积温与成虫累积羽化率之间关系的 Logistic 回归模型，由每年的回归模型分别计算出田间黑纹粉蝶 50% 雌雄个体羽化时（羽化高峰期）已获得的有效积温，平均值分别为 142.2 ± 12.2 日·度和 149.2 ± 13.8 日·度，这也与室内恒温条件下成虫滞育后发育的有效积温基本相一致（表 1）。把 7 年数据结合起来建立黑纹粉蝶越冬蛹滞育后发育与温度关系的 Logistic 复合模型（雄蛹：$y = 100/[1 + \exp(9.710600 - 0.075233x)]$，$R^2 = 0.9926$，$P < 0.01$；雌蛹：$y = 100/[1 + \exp(8.220700 - 0.061073x)]$，$R^2 = 0.9920$，$P < 0.01$），拟合模型的决定系数均达到极显著水平，表明模型可以用来描述温度与黑纹粉蝶越冬蛹累积羽化率的关系。此外，如以 2 月 1 日以后的有效积温（雄虫：133.3 日·度和雌虫：155.7 日·度）来预测 50% 个体羽化日期，预测日期与田间实际成虫羽化高峰日期平均相差 2 ~ 5 d（表 1）。

需指出，在极端冬暖的 2007 年，成虫翌年春季的羽化受到很大的影响。由于 2007 年 2 – 3 月温度较常年偏高近 6℃，造成 2006 年的越冬个体在 2007 年春季的羽化特别分散，羽化期达到 44 d。这导致应用理论的滞育后发育起点温度和有效积温来预测田间雌雄成虫的发生期，理论预测值与实际观察值相差达 15 ~ 20 d。

3　讨论

昆虫滞育后的发育在不同性别间存在差异的现象非常普遍，而且通常是雄虫先羽化，雌虫后羽化，导致这种现象的原因主要是由于滞育后发育的速率和起点温度不同（Wiklund and Fagerström, 1977）。黑纹粉蝶越冬蛹滞育后发育起点温度和有效积温的研究表明，雄蛹滞育后发育的起点温度和有效积温均略低于雌蛹（图 1），这与田间自然条件

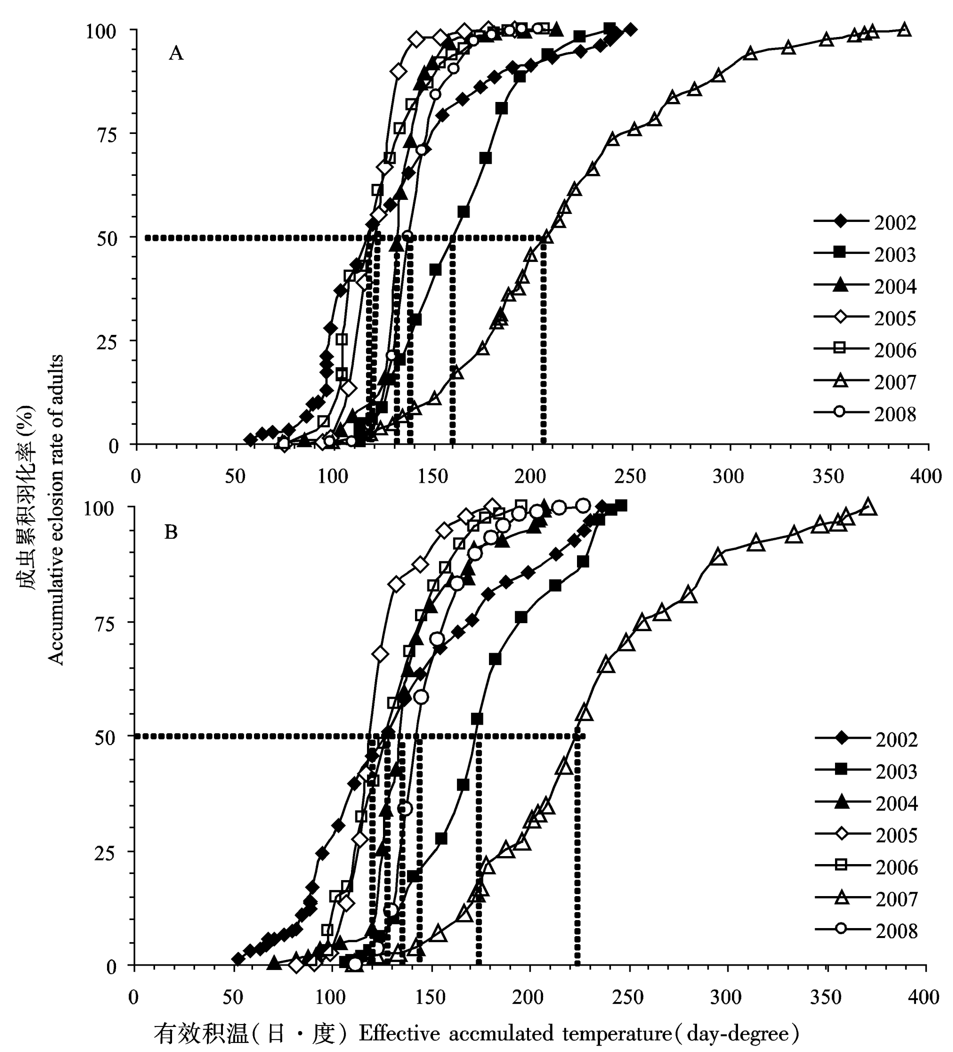


图 2 黑纹粉蝶越冬雄蛹(A)和雌蛹(B)田间羽化动态与有效积温的关系

Fig. 2 Relationship between cumulative proportions of hibernating male (A) and female (B) emergence and effective accumulated temperature of *Pieris melete* maintained under natural conditions

A: n = 211 – 984; B: n = 203 – 982.

下雄蛹先羽化，雌蛹后羽化的生物学特性相一致。雄虫早于雌虫羽化有利于提前吸食花蜜补充营养，促进雌雄交配与后代繁殖(薛芳森等，1996；肖海军和薛芳森，2007)。

在对二化螟 *Chilo suppressalis* 越冬幼虫的研究中，我们在探明该虫滞育后发育的阈值温度和有效积温的基础上，将历年二化螟春季田间化蛹进度与有效积温，建立二化螟越冬幼虫化蛹率与有效积温关系的 Logistic 回归方程，利用此方程证实了二化螟田间 50% 个体化蛹的时间与 2 – 4 月的气温密切相关。因此，只要掌握了 2 – 4 月的气温资料，就可预测二化螟田间越冬幼虫 50% 个体化蛹的时间(肖海军等，2008)。在本实验中，我们也证实了利用黑纹粉蝶越冬蛹滞育后的发育阈值温度和有效积温，历年越冬蛹第二年春季的羽化进度和 2 – 4 月的气温建立的 Logistic 回归方程(除了极端冬暖的 2007 年外)，可预测田间春季黑纹粉蝶 50% 个体的羽化日期。可见，如果探明了农作物害虫越冬虫态滞育解除后的发育阈值温度和有效积温，又掌握了多年越冬虫态在春季的发育进度，就可建立预测物候学模型，对第一代害虫的发生期进行较准确的预测。遗憾的是这方面的研究工作至今没有引起足够的重视，仅在几种重要害虫中有过滞育解除后的发育阈值温度和有效积温的报道(蒋明星和张孝羲，1997；Hao and Kang，2004；肖海军等，2008)。

表 1　黑纹粉蝶越冬蛹 50%个体羽化日期的观察值与预测值

Table 1　Observed and predicted date for 50% hibernating pupae of *Pieris melete*

年份 Year	性别 Sex	观察值 Observed value		预测值（月-日） Predicted date for 50% adult eclosion (month-day)	差距(d) Distance
		50%羽化日期(月-日) Date for 50% adult eclosion (month-day)	有效积温(日·度) Effective accumulated temperature (day-degree)		
2002	♂	03-09	120.4	03-11	−2
	♀	03-11	126.4	03-14	−3
2003	♂	03-26	160.3	03-23	3
	♀	03-28	172.3	03-26	2
2004	♂	03-04	132.0	03-04	0
	♀	03-06	133.1	03-09	−3
2005	♂	03-29	119.6	03-31	−2
	♀	03-31	119.1	04-03	−3
2006	♂	03-18	118.1	03-20	−2
	♀	03-21	127.7	03-25	−4
2007	♂	03-14	207.5	02-27	15
	♀	03-23	222.1	03-03	20
2008	♂	03-15	136.9	03-15	0
	♀	03-17	145.0	03-18	−1
Mean ± *SE*	♂		142.2 ± 12.2		1.7 ± 2.3
	♀		149.2 ± 13.8		1.1 ± 3.2

依据 2 月 1 日以后的有效积温(雄虫:133.4 日·度;雌虫:155.7 日·度)，预测 50%个体羽化的日期。Predicted date for 50% adult eclosion was determined using the theoretical effective accumulative temperature of 133.4 and 155.7 day-degrees for male and female, respectively, since February 1st.

参 考 文 献 (References)

Danks HV, 1987. Insect Dormancy: an Ecological Perspective, Vol. 1. Biological Survey of Canada (Terrestrial Arthropods). National Museum of Natural Sciences, Ottowa.

Hao SG, Kang L, 2004. Postdiapause development and hatching rate of three grasshopper species (Orthoptera: Acrididae) in Inner Mongolia. *Environ. Entomol.*, 33(6): 1 528 – 1 534.

Jiang MX, Zhang XX, 1997. Diapause termination and postdiapause development of overwintering pupae of cotton bollworm in Nanjing. *Acta Entomologica Sinica*, 40(4): 366 – 373. [蒋明星，张孝羲，1997. 南京地区棉铃虫越冬蛹滞育的解除与发育. 昆虫学报，40(4): 366 – 373]

Tauber MJ, Tauber CA, Masaki S, 1986. Seasonal Adaptations of Insect. Oxford University Press, New York and Oxford.

Wiklund C, Fagerström T, 1977. Why do males emerge before females? A hypothesis to explain the incidence of protandry in butterflies. *Oecologia*, 31(2): 153 – 158.

Xiao HJ, 2008. Regulation Mechanism of Photoperiod and Temperature on Summer and Winter Diapause in the Cabbage Butterfly *Pieris melete* (Lepidoptera: Pieridae). Ph. D. Dissertation, Jiangxi Agricultural University, Nanchang. [肖海军，2008. 黑纹粉蝶夏季滞育和冬季滞育光温调节机制的研究. 南昌：江西农业大学博士学位论文]

Xiao HJ, Xue FS, 2007. A comparison of adults' eclosion characteristic between aestivating and hibernating pupae. In: Li DM *et al*. eds. Research Progress of Entomology. China Agricultural Scientech Press, Beijing. 413 – 416. [肖海军，薛芳森，2007. 黑纹粉蝶越夏蛹与越冬蛹羽化特点的比较. 见：李典谟等主编. 昆虫学研究动态. 北京：中国农业科学技术出版社. 413 – 416]

Xiao HJ, Zhu XF, Xue FS, 2008. Threshold and effective accumulative temperatures for post-diapause development of the over-wintering larvae of *Chilo suppressalis*. *Plant Protection*, 34(4): 78 – 81. [肖海军，朱杏芬，薛芳森，2008. 二化螟越冬幼虫滞育后发育的起点温度与有效积温. 植物保护，34(4): 78 – 81]

Xue FS, Kallenborn HG, Wei HY, 1997. Summer and winter diapause in pupae of the cabbage butterfly, *Pieris melete* Ménétriés. *J. Insect Physiol.*, 43: 701 – 707.

Xue FS, Zhu XF, Wei HY, 1996. Biology of *Pieris melete* Ménétriés. *Jiangxi Plant Protection*, 19(1): 1 – 4. [薛芳森，朱杏芬，魏洪义，1996. 黑纹粉蝶的生物学. 江西植保，19(1): 1 – 4]

(责任编辑：袁德成)